



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MĚŘENÍ SOUČÁSTI PŘÍSTROJEM FARO

COMPONENT MEASUREMENT WITH A FARO DEVICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Grepl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Grepl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření součásti přístrojem FARO

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Realizace metody měření na vzorové součásti. Zobecnění pro obdobné situace, tj. sestavení souboru dat pro všeobecné využití.

Cíle bakalářské práce:

1. Představení systému FARO.
2. Rozbor měřené součásti.
3. Návrh a realizace procesu měření.
4. Zpracování získaných dat.
5. Technicko–ekonomické posouzení.
6. Diskuze výsledků.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s.r.o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s.r.o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s.r.o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s.r.o. a Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Praha: Scientia, s.r.o., 2000. 986 s. ISBN 80-7183-164-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o měření součásti nejnovější technologií FARO. Na úvod je představena technologie FARO a ty nejvýznamnější produkty mezi měřicími rameny. Dále je čtenáři představena měřená součást se všemi důležitými vlastnostmi, které jsou potřeba k měřenému procesu znát. Praktickou část zastupuje krok po kroku popsáný měřicí proces. Cílem měření, je ověřit autorem předepsané rozměry a geometrické tolerance na výkrese součásti, pomocí měřicího ramene. Součástí práce je výstupní protokol měřicího procesu, vytvořený programem PolyWorks. Na závěr je součást označena za nevyhovující kus, kvůli nesplnění maximálně dovolených předepsaných odchylek.

Klíčová slova

faro, měření součásti, inovace, metrologie, laserové měření

ABSTRACT

This theses deals with the measuring of comparts from the lastest technology FARO. It introduces technology FARO and the most significant products among the measuring arms. Subsequently, all the features of the measured particles, that are necessary to know for the whole process, are mentioned. The whole process of measurement is described step by step in the practical part. The aim of the measurement is to verify the dimensions which are prescribed by the author and geometrical tolerance of the particles via measuring arm. The thesis also consists of a final protocol of the measuring process, created by the program PolyWorks. Finally, the particle is considered to be incompatible, due to the unfullfilness of the maximum prescribed deviations.

Key words

faro, part measurement, inovation, metrology, laser measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GREPL, Martin. *Měření součástí přístrojem FARO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 38 s., 8 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Měření součástí přístrojem FARO** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Martin Grepl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Dále chci poděkovat firmě Valiant TMS s.r.o., která mi umožnila naměřit svoji práci na jejich přístroji.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	8
1 PŘEDSTAVENÍ TECHNOLOGIE FARO.....	9
1.1 Popis přístroje	10
1.2 Typy přístrojů.....	12
1.2.1 Faro Arm Edge.....	13
1.2.2 Faro Arm Fusion	14
1.2.3 Faro Arm Prime.....	15
1.2.4 Faro Gage.....	16
1.2.5 Faro Laser Line Probe V3	17
1.2.6 Faro Laser Line Probe V4	18
1.2.7 ScanArm HD	19
2 ROZBOR MĚŘENÉ SOUČÁSTI	20
2.1 Materiálové vlastnosti	20
2.2 Detail součásti	20
3 NÁVRH A REALIZACE PROCESU MĚŘENÍ, zpracování získaných dat	22
3.1 Proces měření	22
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ POSOUZENÍ	27
4.1 Bezpečnost.....	27
4.2 Vybavení obsluhy	28
4.3 Školení obsluhy	28
4.4 Nacenění	29
4.5 Konkurence.....	29
4.6 Dodatečné informace	30
5 DISKUZE	31
5.1. Sériová výroba	31
5.2 Výsledky	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	36
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	37
SEZNAM PŘÍLOH	38

ÚVOD

V současné době jde technika obrovskou rychlostí kupředu. Snaha dosáhnout přesnějších a kvalitnějších výstupů, nutí společnosti jít vstříc pokroku. Každý stroj musí splňovat ty nejpřísnější normy, aby mohl být zařazen do provozu. Často jde i o souboj s časem a každá vteřina hraje při velkosériové výrobě obrovskou roli. Proto je nutné využívat profesionální technologie, které zkracují výrobní časy a eliminují chyby zapříčiněné lidským faktorem a tím zvyšují kvalitu celé výroby. Dnes se významně uplatňuje i průmyslová automatizace a robotizace strojů. Přesnosti robotických měřidel, CNC center, víceosých obráběcích strojů apod. nemají konkurenci a jen těžko si už bez nich lidstvo dokáže výrobní linky představit. Využití je ve všech odvětvích průmyslu.

Velký rozmach zažívá i technologie laserového měření FARO. Tuto technologii zprostředkovává společnost FARO Technologies Inc. Společnost vznikla již na začátku 90. let, kdy ji založili v roce 1982 Simon Raab a Greg Fraser. Nejprve šlo o výrobu měřicí techniky do lékařského prostředí – konkrétně pro chirurgii. Později se technologie začala uchylovat k průmyslu a postupně se probojovala na pozici lídra mobilního měření. Specializuje se především na výrobu Měřicích laserových ramen, skenerových ramen a jejich příslušenství. Tato ramena jsou kompaktní, všestranná, jednoduše ovladatelná a disponují bezdrátovým propojením mezi ramenem a počítačem. Měření spočívá v dotyku kalibrovaného hrotu s měřenou součástí. Software následně vyhodnotí data a rychle tak lze dostat přesné informace o požadovaných rozměrech.

Měřicí přístroje FARO nejsou v České republice úplně známé. Autorovým cílem je pomocí téhle práce dostat měřicí systémy FARO do podvědomí lidí a hlavně studentů, kteří budou již brzy součástí mnoha výrobních firem [1].



Obr. 1 ÚVOD Měřicí ramena FARO [2].

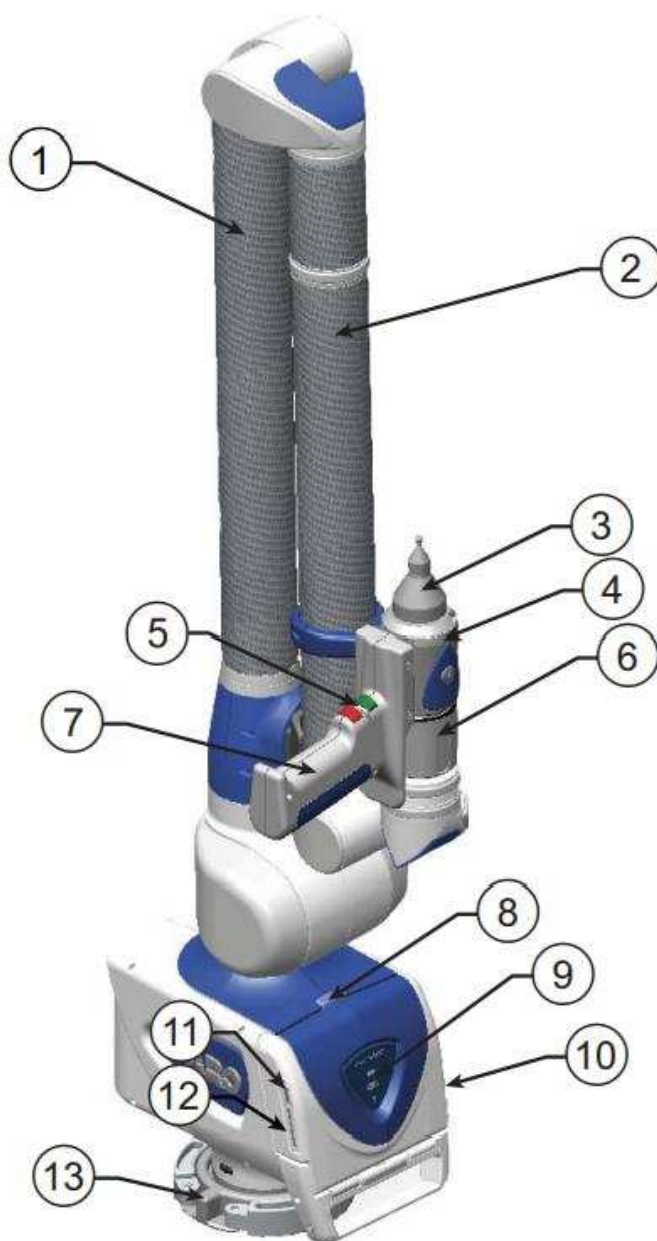
1 PŘEDSTAVENÍ TECHNOLOGIE FARO

Společnost FARO Technologies Inc. poskytuje především mobilní měřicí systémy známé jako FAROArm, neboli měřicí ramena, která se vyrábí ve více výrobních řadách. Jedná se především o 6-osá nebo 7-osá kloubová ramena pracující s programem Polyworks nebo FARO CAM 2 Measure. Zajišťuje rychlé a pohodlné měření využívající CAD data. Každý naměřený bod má své rotační optické kódování. Následně jsou kódované signály zpracovány a za použití pokročilé teplotně kompenzující technologie a pozičních dat posílány do dotykového snímače na rameni nebo do počítače, spojeným s ramenem ať už pomocí USB kabelu nebo bezdrátově (Bluetooth, WiFi). Základní vybavení ramena obsahuje spoustu elektronických prvků jako spouštěcí tlačítko, elektrický informační panel, sklápěcí dotykovou obrazovku a komunikační porty. Naopak zapisování a čtení z flash paměti není závislé na energii. Paměť je možno mazat i přepisovat. Samotná ramena nejsou vybavena vestavěnou pamětí, a proto nejsou schopna uchovat naměřená data. Měřicí sonda je na rameni nejvzdálenějším prvkem od základny. Je možné s ní volně manipulovat v jakémkoliv směru. Na sondě jsou dvě kontrolní tlačítka – červené a zelené. Jako zpětná vazba při měření, slouží uživateli dva kruhové světelné indikátory, které jsou umístěny na obvodu sondy. Pro snadné skladování je sonda vybavena magnetem, který ji umožňuje přichytit k rameni [1], [3].

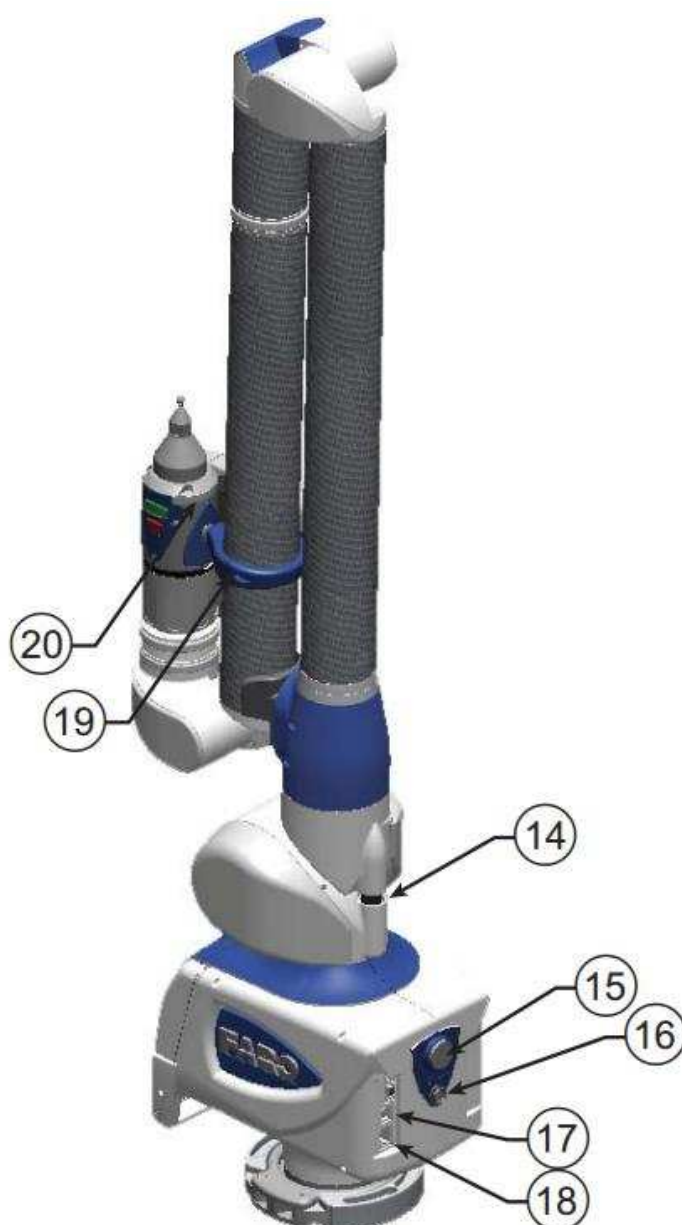
V posledních letech představila společnost FARO Technologies Inc. na trh nové ScanArm ramena (skenery), díky nimž už není potřeba vymodelovaný CAD model. Skenovací ramena umožňují přenést víc než půl milionu bodů za vteřinu. FARO Technologies Inc. přišlo s novinkou řady Platinum a vývojem nových vyspělých řad. Nyní společnost poskytuje nemodernější a nejvyspělejší měřicí ramena v historii. Tyto produkty jsou spojením několikaletého vývoje a výzkumu s mnoha patenty a inovacemi. Jsou vybaveny standardním USB 2.0 portem, Ethernetem, bezdrátovou LAN technologií a disponují i bezdrátovým Bluetooth rozhraním. Starší série FARO Edge a nejnovější řady mají navíc ještě WiFi rozhraní. Další výhodou je i hmotnost ramen. Ta je až o 30 % nižší než u ramen konkurenčních. I při tak nízké hmotnosti mají ramena zabudovanou baterii, se kterou je možno provazovat je až po 8 hodin. Upínací systém je vyřešen hned několika variantami. Každé rameno má 90mm základnu, na níž je možné připevnit trojnožku, vakuovou přísavku nebo magnet, což umožňuje uživateli měřit prakticky kdekoliv. Díky neomezené rotaci kloubů a vestavěnému vnitřnímu vyvažování je práce s ramenem velmi snadná [1], [3].

1.1 Popis přístroje

V téhle kapitole je uveden popis jednotlivých částí ramene FARO Edge. Ramena jsou si velmi podobná. Liší se pouze technickými parametry, velikostí a schopností skenovat či využívat laser.



Obr. 2 Rameno FARO Edge – pohled zepředu (1 – otočné rameno 1, 2 – otočné rameno 2, 3 – sonda, 4 – LED rukojeť, 5 – tlačítka, 6 – rukojeť, 7 – rukojeť (odstranitelná), 8 – magnetické tlačítko, 9 – informační panel, 10 – sklápěcí dotyková obrazovka, 11 – USB port, 12 – SD RAM port, 13 – základna) [4].



Obr. 3 Rameno FARO Edge – pohled zezadu (14 – *tlumič*, 15 – *tlačítko zapnout/vypnout*, 16 – *nabíjecí port*, 17 – *USB port*, 18 – *ethernet port*, 19 – *magnet na uchycení rukojeti*, 20 – *LED rukojet*) [4].



Obr. 4 Rameno FARO Edge – základna (1 – baterie, 2 – uvolňovací páčky, 3 – základna, 4 – SD RAM port, 5 – USB port, 6 – sklápěcí dotyková obrazovka, 7 – magnetická úchytka) [4].

Na obr. 2 je vidět přední pohled ramene Edge a sonda v nepracovní pozici připnutá na kostře ramene. Na obr. 3 je představeno rameno Edge ze zadního pohledu a obr. 4 ukazuje základnu ramene se sklápěcí obrazovkou, která slouží k poskytnutí hlavních informací i k nastavení ramene.

1.2 Typy přístrojů

Společnost FARO Technologies Inc. představila od svého vzniku mnoho modelových řad měřicích ramen. Každá řada má trochu jiné technické parametry. Některé se používají na ověřování rozměrů součástí jako součást reverzního inženýrství, jiné zase jako skenery. Ramena své funkce mohou i kombinovat. Příkladem je klasické rameno FARO Edge (vyobrazeno v popisu). Přidáním liniového skeneru FARO Laser Line Probe V4 vzniká multifunkční skener. Protože se zrovna takhle úprava stala jednou z nejžádanějších, vytvořil se pro tak upravené rameno speciální název FARO Edge ScanArm. Pro jasnější přehled je třeba zavést ramena do kategorií podle hlavní modelových řad [1], [3].

1.2.1 Faro Arm Edge



Obr. 5 FARO Edge [7].

Jde o úplně novou sérii Měřicích ramen, vybavenou těmi nejnovějšími technologiemi. Nejpokrokovější série Edge se vyvinula z předchozí série Quantum. Vyniká rychlým upínacím systémem, jednou z nejvyšších přesností mezi rameny a v neposlední řadě disponuje bezdrátovou komunikací WiFi a rozhraním Bluetooth. Všechny tyto přednosti využívá Edge pro ještě lepší komfort měření, který podporuje i sklápěcí dotykový LCD displej s operačním systémem, což je další novinka u měřicích ramen tohoto typu. Je prvním ramenem, které disponuje integrovaným měřicím asistentem. Pracovní rozsahy ramene jsou 1,8 m, 2,7 m a 3,7 m. Obecně platí, že rameno s malým rozsahem disponuje větší přesností a naopak. Proto u rozsahu 1,8 m má rameno při opakovatelném měření přesnost $\pm 0,03$ mm a při rozsahu 3,7 m se úchylka posune na $\pm 0,09$ mm. Přesnější hodnoty jsou uvedeny v tab. 1. Na závěr nesmí být opomenuto zmínit největší výhodou Edge ramena. Tou je bezesporu možnost osazení sondy skenerem a vytvořit tak FARO Laser Line Probe V4 aneb multifunkční skener. Celková hmotnost ramene je zhruba 11 kg [5].

Specifikace ramene:

- snadné ovládání,
- pohodlnější manipulace,
- efektivita a spolehlivost měření,
- vysoká rychlost měření i bez počítače.

Využití:

- Automobilový a letecký průmysl
 - vyrovnávání a měření komponent,
 - nastavování a skenování forem.
- Kovovýroba
 - reverzní inženýrství prototypů a měřených dílů,
 - použití v malosériové i velkosériové výrobě [5].

1.2.2 Faro Arm Fusion



Obr. 6 FARO Fusion [6].

Rameno Fusion nahradilo předchozí série modelů Titanium a Gold. Rameno vyniká svojí vysokou přesností a skvělou ergonomií. Měřicí rozsah je stejný jako u ramene Edge. Výhodou však je větší možnost Měřicích rozsahů. Zatímco většina ramen se dá pořídit pouze ve třech velikostech, ramena Fusion mají čtyři velikosti. Rozsah začíná na 1,8 m a pokračuje 2,4 m, 3,0 m až k 3,7 m. Úchylka při opakovatelném měření je $\pm 0,036$ mm u nejmenšího měřicího rozsahu a $\pm 0,104$ mm u rozsahu největšího. Hmotnost ramene se pohybuje okolo 9 kg [6].

Specifikace ramene:

- víceosé provedení (6,7),
- více Měřicích rozsahů,
- nízké pořizovací náklady.

Využití:

- Automobilový a letecký průmysl
 - vyrovnávání a měření komponent,
 - nastavování a skenování forem.
- Kovovýroba
 - reverzní inženýrství prototypů a měřených dílů,
 - použití v malosériové i velkosériové výrobě [6].

1.2.3 Faro Arm Prime



Obr. 7 FARO Prime [7].

Série Prime byla představena jako poslední. Byla uvedena na trh a nahradila starší ramena Platinum. Oproti starší sérii dosahuje vyšších měřicích přesností. Vyrábí se jen se šesti klouby, proto se používá pro měření pevným dotykem tzn. že se sonda při přijímání pozice součástí nepohybuje, jak je tomu například u měření skenerem. Co se týče velikostí, nemá rameno Prime konkurenci. Vyrábí se hned v 5-ti velikostech začínajících na rozsahu 1,2 m. Největší rozsah je zde podobně jako u jiných ramen 3,7 m. Při opakovatelnosti měření výrobce zaručuje úchytky $\pm 0,016$ mm na nejmenším rameni a $\pm 0,060$ mm na rameni největším. Přednost ramene je ukryta v horním kloubu. Jsou zde zabudovány senzory teploty a senzory přetížení. Díky téhle vymoženosti, je rameno Prime schopno kompenzováním teplotní změny a nesprávné manipulace docílit nejpřesnějších naměřených hodnot. Pro větší mobilitu je rameno vybaveno baterií s delší životností. I přes tyhle skvělé vlastnosti hmotnost ramene nepřesahuje 10 kg a to činí rameno Prime opravdovou špičkou mezi měřicími rameny [7].

Specifikace ramene:

- velká přesnost měření,
- pouze 6-osé rameno,
- konstrukce z kompozitu,
- technologie 3D měření,
- variabilita velikostí.

Využití:

- Automobilový a letecký průmysl
 - vyrovnávání a měření komponent,
 - nastavování a skenování forem.
- Kovovýroba

- reverzní inženýrství prototypů a měřených dílů,
- použití v malosériové i velkosériové výrobě.
- Formy
 - Výroba prototypů a jejich následné skenování [7].

1.2.4 Faro Gage



Obr.8 FARO Gage [8].

Rameno s názvem Gage je jiné než ostatní ramena. Liší se tím, že nepatří do série měřicích ramen. Jako všechna předchozí ramena i Gage se vyvinul z předchozích typů ramen. Je navržen pouze pro osobní účely, protože má jen omezený měřicí rozsah a to 1,2 m. Jeho výhodou je intuitivní software, který se snadno používá a je ideální pomocníkem pro náročnější měření v menších dílnách, protože dokáže zastoupit všechny měřicí přístroje. Při opakovatelném měření výrobce deklaruje úchylku $\pm 0,018$ mm. V přesnosti měření se může srovnávat i s dražšími rameny. Využívá software FARO SmartInspect a disponuje bluetooth rozhraním i širokou nabídkou příslušenství [8].

Specifikace ramene:

- velká přesnost měření,
- snadné ovládání,
- mobilita,
- velmi nízké pořizovací náklady.

Využití:

- Automobilový průmysl
 - drobné opravy,
 - přeměřování komponent,
 - karoserie.
- Slévárenství
 - kontrola forem,
 - přeměřování odlitků [8].

1.2.5 Faro Laser Line Probe V3



Obr. 9 FARO Laser Line Probe V3 [9].

Laser Line Probe V3 je skenovací systém, který se používá jako příslušenství k sedmiosým ramenům. Tedy vhodný pro řady Edge nebo Fusion. Je bezkontaktní a funguje na principu laseru. Přístroj je k rameni připojen jen krátkým kabelem. Obsluhu tak nic neomezuje v pohodlném měření. Při pořizování skener Laser Line Probe V3 je důležité si uvědomit, že se nejedná o samostatný skener, ale pouze o příslušenství k ramenům. Je tak dosaženo multifunkčního zařízení, nikoliv však těch nejlepších skenovacích parametrů. Rychlost skenování u takto vybaveného ramene je kolem 19 000 bodů za sekundu, což je v porovnání se samostatnými skenery o poznání méně, avšak cena je zde mnohem příznivější. Úchylka přístroje je $\pm 0,035$ mm, ovšem k ní se musí přičíst i úchylka samotného ramene. Jako jediný skener je vybaven rozhraním bluetooth. Vlastnosti jako vysoká odolnost a mobilita z něj dělají skvělý nástroj pro kontrolu komponent při reverzním inženýrství [9].

Specifikace Laser Line Probe V3:

- multifunkčnost,
- mobilita,
- velmi nízké pořizovací náklady.

Využití:

- Automobilový a letecký průmysl
 - měření komponent a forem,
 - nastavování strojů a náradí.
- Kovovýroba
 - kontrola prototypových součástí [9].

1.2.6 Faro Laser Line Probe V4



Obr. 10 FARO Laser Line Probe V4 [10].

Novinkou v příslušenství je Laser Line Probe V4. Jedná se o modernějšího a výkonnějšího pomocníka, využívajícího ty nejnovější technologie. Probe V4 je kompatibilní s modelovou řadou značky Edge. Spolu tvoří FARO Edge ScanArm. Skener je schopen snímat 45 120 bodů za sekundu v ještě větším záběru (90 mm). Tyto vlastnosti v kombinaci se skvělou pohyblivostí ramene, umožňují urychlit proces měření. Samotný skener má hmotnost pouhých 76,6 g, tím si zachovává stále skvělou mobilitu. Připevnění skeneru k sondě zajišťuje multifunkční konektor [10].

Specifikace Laser Line Probe V4:

- multifunkčnost (dotyk + laser),
- mobilita,
- snímáno více než 45 000 bodů za sekundu.

Využití:

- Automobilový a letecký průmysl
 - drobné opravy,
 - přeměrování komponent.
- Výroba forem
 - kontrola [10].

1.2.7 ScanArm HD



Obr. 11 FARO ScanArm HD [11].

ScanArm HD je nejnovějším příslušenstvím k ramenům a dokáže snímat 560 000 bodů za sekundu, při rozlišení až 2000 pixelů v jedné přímce (280 snímků za vteřinu). Přesnost je deklarována na $\pm 0,025$ mm, což po propojení skeneru s ramenem vytváří kompaktní systém. Díky těmto skvělým vlastnostem se rychlost měření rapidně zmenšuje. Skener je kompatibilní s rameny Edge. Pyšní se novou technologií modrého liniového laseru, která spočívá ve zkrácení vlnové délky laseru a tím snáze naměří hodnoty i z lesklých a čirých povrchů při jakémkoli osvětlení. S novými technologiemi přišla samozřejmě i řada nových vymožeností. Jednou z nich je třeba funkce zjištění ohniskové vzdálenosti. To umožňují LED diody umístěné na hlavici. Celkové ovládání ramene je mnohem snazší a pro obsluhu přijatelnější. Skener má rozdílené vlastnosti, které jsou závislé na velikosti laseru. Rozpětí skenovací plochy je od 80 až do 150 mm. Hmotnost samotného laseru je 485 g [11].

Specifikace ScanArm HD:

- multifunkčnost (dotyk + laser),
- rychlé a snadné měření,
- až 560 000 bodů za sekundu,
- až 2000 pixelů x 280 snímků.

Využití:

- Automobilový a letecký průmysl
 - inspekce komponent a prototypů,
 - reverzní inženýrství.
- Kovovýroba
 - kontrola při malosériové i velkosériové výrobě [11].

2 ROZBOR MĚŘENÉ SOUČÁSTI

Ještě před tím, než je měření provedeno, je potřeba seznámit se se součástí. Vždy je potřeba mít měřený objekt prozkoumaný. Důležité je i dobré rozvržení měřicího postupu. Rozmyslet si, jak nejlépe součást upnout a kde snímat body, aby se zamezilo odchylkám. V neposlední řadě závisí i na materiálu.

2.1 Materiálové vlastnosti

Pokud se sondují data z lesklých povrchů, může docházet k mírným odchylkám hodnoty. U matných povrchů je zaručena přesnost daleko větší.

Součást, na které budu měřící proces proveden je z hliníkového materiálu, a protože je dobré vědět co nejvíce informací o měřeném objektu, je nutné zjistit základní vlastnosti o hliníku:

- lehký a lesklý kov,
- vodivý materiál,
- kujný,
- tvárný,
- dobře se rozpouští v kyselinách,
- teplota tání: 660 °C,
- teplota varu: 2 519 °C,
- tvrdost: 2,75 (Mohsovy stupnice tvrdosti)
- měrná hmotnost: 2 669 kg/m³ [12], [13].

Hliník je dnes používaný zejména v elektrotechnice a má uplatnění i ve svařování. Je znám i díky svým sloučeninám. Mezi nejznámější patří Al₂O₃ nebo-li oxid hlinitý, který v přírodě existuje v mnoha modifikacích. Hlavní rudou hliníku je Bauxit s chemickým vztahem Al₂O₃ · 2H₂O (dihydrát oxidu hlinitého) [12], [13].

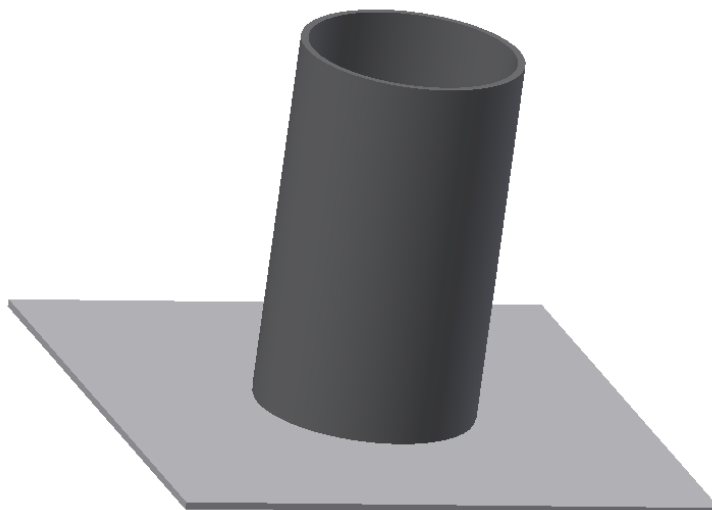
2.2 Detail součásti

Součást je svařena ze čtvercové základny o tloušťce 2 mm a válcové trubky o vnějším průměru 60 mm, tloušťce stěny 2 mm a délce 98 mm. Základna má ve svém středu otvor o průměru 20 mm. Na krajích je mírně zvlněná vlivem tepelného působení po svařování. Obě části jsou z hliníku, jehož vlastnosti jsou uvedeny výše.

Svar byl zhotoven tavící se elektrodou v inertním plynu metodou MIG. Jedná se o metodu, kdy se svařuje v ochranné atmosféře inertního plynu. Jako ochranný plyn byl použit Argon.



Obr.12 Fotografie měřené součásti.



Obr. 13 *Měřená součást* – Autodesk Inventor 2017.

3 NÁVRH A REALIZACE PROCESU MĚŘENÍ, ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH DAT

Protože je měření pomocí FARO přístrojů s velkou oblibou používáno k reverznímu inženýrství, autor práce předepisuje tolerance na výkres svařence a měřením ověří, zda svařená součást odpovídá předepsaným tolerancím. Tolerance nejsou zvoleny přísně. Teď už je na přístroji, aby ověřil, zda svařenec odpovídá předepsanému nebo se jedná o nevyhovující kus. Měření bylo prováděno přístrojem FARO Prime o velikosti rozsahu 3,7 m a deklarovanou odchylkou při opakovaném měření $\pm 0,060$ mm. Tyto parametry jsou dostačující na to, aby bylo zjištěno, zda měřená součást odpovídá předepsaným geometrickým tolerancím na výkrese [7].

3.1 Proces měření

Samotný proces měření není nijak složitý. Je potřeba dodržet tyto podmínky:

- dbát na bezpečnost,
- dobré seznámení s přístrojem,
- vyčistit pracovní prostory (především kolem pohyblivé části ramene)
- nastavit počáteční parametry přístroje (umožní eliminovat odchylky).

Postup měřicího procesu:

1. Na počátku měření je potřeba zvolit vhodný prostor, kde bude měření provedeno. Rameno nesmí při jeho pohybu nic překážet.
2. Jakmile je stroj ukotven k zemi, nesmí se s ním během měření manipulovat (došlo by ke znehodnocení dat a celý proces by se musel opakovat). Rameno se musí uchytit buď přímo k zemi nebo na měřicí desce, které má dnes každá větší výrobní hala k dispozici.
3. Když je rameno zafixováno k podkladu je na řadě i měřená součást. Ta se musí uchytit buď do svěráku, na měřicí stůl pomocí upínek nebo připevnit k měřicí desce.
4. Jakmile je vše ukotveno pokračuje v nastavení přístroje.
5. Následně se počítač propojí s přístrojem (USB, bluetooth). Na počítači se spustí vhodný program, který je kompatibilní s přístrojem. V případě této práce jde o program Polyworks. Až se rameno propojí s počítačem, program nabídne hlavní okno obsahující šest příkazů – Nová součást, konstruovat, měřit, soubory, nastavení a diagnostika [4]



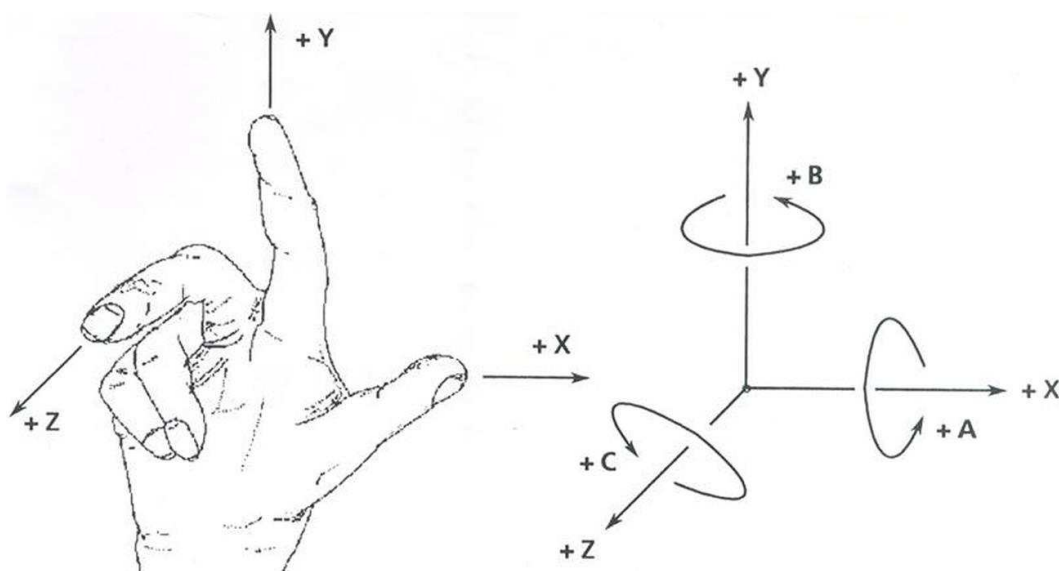
Obr. 14 Hlavní nabídka programu [4].

6. Po kliknutí na příkaz “Nová součást” je vytvořen nový soubor a vymažou se tak předchozí naměřené údaje.
7. Nyní je možno zadat název součásti (není nutností pro uložení souboru). Zadá se i číslo součásti a pak se potvrdí zadaná data kliknutím na tlačítko “OK”.
8. Jako další se zvolí příkaz “Konstruování”. Tím se nabízí nový výběr příkazů – nastavení součásti, délky, úhly a vlastnosti. Tady se jako první vybere ikona “Nastavení součásti” [4].



Obr. 15 Výběr příkazů při měření součásti [21].

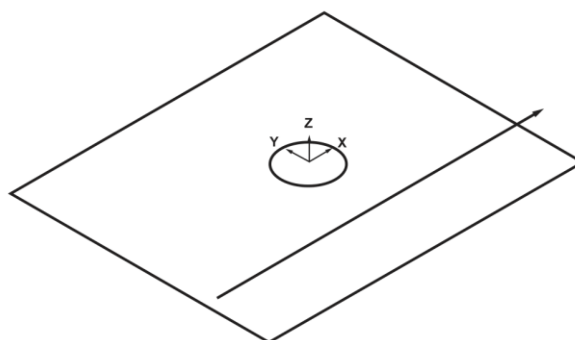
Nejdůležitější je zkoordinovat rameno s měřenou součástí. Nabídka “Nastavení součásti” umožňuje vytvořit souřadný systém, který je přiřazen k součásti. Všechny souřadné systémy využívají pravidlo pravé ruky. Kartézský souřadný systém popisuje polohu bodů v prostoru díky třem na sebe kolmým osám X, Y, Z. Průsečík těchto os určuje nulový bod systému. Každá osa vychází z nulového bodu podle pravidla pravé ruky. To udává, že hodnoty na osách vycházejících z nuly podle přiřazeného prstu mají kladné hodnoty [4].



Obr. 16 Pravidlo pravé ruky [4].

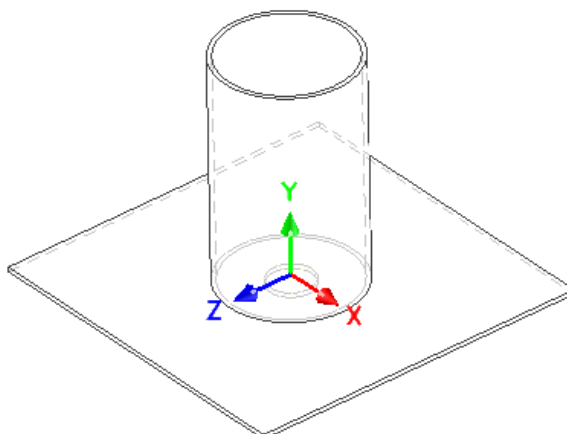
Kartézský souřadný systém se dá určit mnoha způsoby. Jaký zvolit způsob určení, napovídá tvar součásti. Je celkem 6 typů způsobů, jak stanovit souřadný systém. Nejzákladnější je ROVINA-PŘÍMKA-PŘÍMKA další jsou ROVINA-ROVINA-ROVINA, ROVINA-PŘÍMKA-KRUH, ROVINA-KRUH-KRUH, ROVINA-VÁLEC-PŘÍMKA, VÁLEC-VÁLEC-ROVINA. Princip spočívá v tom, že je vybrána jedna z výše uvedených možností, a ta se zvolí pro dané měření. Poté se na modelu v programu označují jednotlivé části (PŘÍMKA, ROVINA,...) a ty se postupně naměřují na naší součásti. Při měření přímky, je nutné sondou určit alespoň 3 body, které leží na stanovené přímce na měřené součásti. Při definování kruhu a roviny se zaznamenávají také alespoň 3 body. Software si poté proloží danou křivku zjištěnými body. Jakmile se zachytí všechny z určujících parametrů, vytváří se kartézský souřadný systém zkoordinovaný se součástí a s modelem v počítači.

U svařence bylo použito vymezení ROVINA-PŘÍMKA-KRUH. Následující obr. 16,17 a 18 ukazují, kde byly které atributy využity [4].



Obr. 17 Nastavení pro součást rovina-přímka-kruh [4].

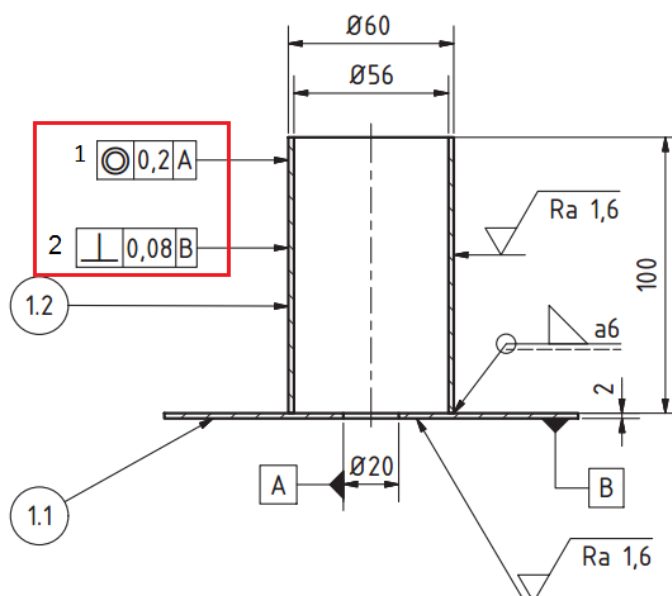
Pro jejich určení bylo sejmuto pro každý atribut 4-5 bodů. Jelikož součást nebyla dokonale přesná, bylo tímto nutné eliminovat úchyly. Nyní je souřadnicový systém vytvořený na průsečíku spodní roviny a osy válcové plochy. [4]



Obr. 18 Umístění souřadného systému po sjednocení modelu se součástí.

Od tohoto systému se počítají všechna naměřená data. Ty rameno vyhodnocuje vždy po stisknutí zeleného tlačítka na sondě. Červené tlačítko naopak vymaže předchozí snímané body. Každý naměřený bod se zapisuje do trojrozměrných vektorů XYZ. Tímto je příprava součásti u konce. Následuje ověřování parametrů, které jsou předepsané na výkresu.

Na samém začátku je třeba ověřit velikost součásti. Na první pohled je podstava součásti lehce zvlněná, což zapříčinila teplota svařování, tím pádem se vyskytly malé odchylky. Musí být stanovena funkční plocha základny pouze v jejím středu (v mezikruží vymezené navařeným válcem). Při svařování se na ni nedostalo dostatek tepla, a proto zůstala nezkroucená. Celkové rozměry součásti byly velmi přesné, ale při navrhování výkresu šlo o to, zda součást odpovídá předepsaným geometrickým tolerancím. V případě této součásti, šlo o kolmost základny s kruhovým válcem a souosost otvoru v základně s válcem. Tolerance kolmosti je na výkresu předepsána 0,08 mm a tolerance souososti na 0,2 mm [4].



Obr. 19 Geometrické tolerance výkresu (1 – souosost, 2 – kolmost).

V programu Polyworks se zvolí na horní liště ikona „geometrické tolerance“. Z nabízených možností je vybrána ta, která je požadována. V případě práce autora je vybrána jako první kolmost. Jakmile se bude sonda pohybovat poblíž součásti, může se přímo v programu sledovat kde se přístroj pohybuje. Při měření kolmosti je prvně naměřeno 4-5 bodů ze základny pro větší přesnost. Poté se zkontroluje, zda hodnoty odpovídají. Pokračuje se měřením strany válce. Ideálně zaměřit alespoň 4-5 bodů na válci. Protože rameno po přiřazení ví, jak součást vypadá, body si seřadí do jedné přímky. Nyní se získaly data ze spodní základny i z válce. Operaci se dokončí a program vyhodnotí snímané údaje. Vše se vypíše v přehledné tabulce, která se může podle libosti upravovat. Lze přidávat a odebírat informační položky, či volit jiné zobrazení parametrů. Když je měření kolmosti u konce, je třeba zkontrolovat výsledky. Odchylka kolmosti činí 0,24 mm. Jelikož bylo stanoveno maximální vychýlení pouze 0,08 mm, vyhodnotil program kolmosti součásti jako „nevyhovuje“.

Tab. 1 Vyhodnocené údaje ke kolmosti.

Kolmost válce				
Parametr	Nominální hodnota	Měřená hodnota	Odchylka	Test
Kolmost		0,24	0,24	Nevyhovuje
Rozměr	60,00	60,04	0,04	Vyhovuje

U ověřování souososti je postupováno podobně jako v předchozím případě. Zvolí se správný postup v programu a porovnávají se data. Je sejmuto 4-5 bodů z otvoru v základně a pokud jsou příslušné hodnoty v pořádku, pokračuje se odměřováním otvoru ve válci. Jakmile je hotovo, potvrdí se ramenu přijaté souřadnice a nechají se programem Polyworks vyhodnotit odchylky a připravit tabulku. Po dokončení tabulka zobrazí údaje, jestli jde o nevhodný díl nebo je součást vyrobena správně. Odchylka souososti je 1,55 mm, a protože je na výkresu maximální povolená úchylka 0,2 mm, program opět vyhodnotil součást jako „nevyhovuje“.

Tab. 2 Vyhodnocené údaje k souososti.

Souosost válce a otvoru				
Parametr	Nominální hodnota	Měřená hodnota	Odchylka	Test
Souosost		1,55	1,55	Nevyhovuje
Rozměr	20,00	20,09	0,09	Vyhovuje

Výsledné popisové tabulky obsahují měřené parametry (kolmost, souosost), nominální hodnoty z výkresu, naměřené hodnoty, odchylky, odpovědi (test), zda-li hodnoty odpovídají nebo neodpovídají (test). Vše se zapíše do výsledného protokolu.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ POSOUZENÍ

Tato kapitola obsahuje rozbor ramen a procesu po technicko-ekonomické stránce. Pod tento pojem spadá vše o bezpečnosti, nacenění, proškolení obsluhy, energetické náročnosti při provozování atd. ...

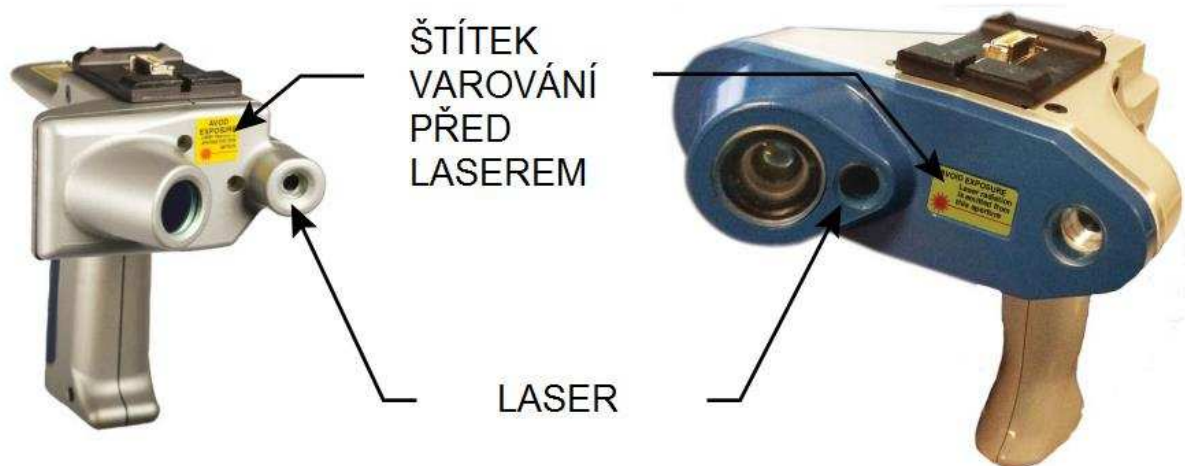
4.1 Bezpečnost

Bezpečnost je vždy stavěna na první místo. Obsluha ramene musí být seznámena se všemi oblastmi rizik, které mohou při měření přístrojem FARO nastat.

V první řadě je třeba pro správné a bezpečné užívání vymezit pracovní prostory, ve kterých bude FARO rameno užíváno. Prostory nesmí být znečištěny. Tím je myšleno hlavně znečištění vodou či prachem. Pokud by rameno přišlo do kontaktu s vodou nebo i jiným druhem kapalin (oleje, mazací tekutiny) v nějakém ze svých elektronicky vybavených míst, mohlo by dojít ke zkratu. Vlhký vzduch přístroji nevadí, ale není povoleno pracovat v prostředí kde by voda mohla kondenzovat. Výrobce deklaruje možnost používání až do 95 % vlhkosti. V prašném prostředí hrozí zanešení pohybových spojů (kloubů). To by mohlo způsobit špatnou manipulaci s ramenem a následně i mírné odchylky v měření [5].

Jako další je potřeba dohlédnout na prostor kolem měřeného procesu, aby při manipulaci ramene nedošlo ke kolizi, nebo dokonce ke svržení blízkého předmětu a poranění obsluhy či poničení přístroje.

Většina ramen je vybavena viditelným laserovým paprskem, který je umístěn na konci měřicí sondy nebo přímo jako výstupek z rukojeti. Obsluha je povinná manipulovat se sondou tak, aby tento paprsek směřoval pouze na měřenou součást a zabránilo se tak zasažení očí.



Obr. 20 Laserové sondy, vyobrazené varování před laserovým paprskem [4].

V neposlední řadě musí být zmíněno správné proškolení a vybavení obsluhy. Tomuto problému jsou věnovány následující kapitoly.

4.2 Vybavení obsluhy

Každá obsluha, která manipuluje s přístrojem musí mít k dispozici správné vybavení. Je třeba zvolit správný oděv, obuv a pomůcky k měření. Jelikož je pro ramena vyžadován dostatečný prostor, bývají umístěna většinou ve velkých výrobních halách. Takové prostory jsou přehledné, a proto není třeba mít při používání speciální ochranné oděvy. Doporučuje se ale dlouhý rukáv a dlouhé nohavice. Důraz je kladen na oblečení bez knoflíků – riziko zachycení. Obuv je třeba mít uzavřenou, aby se při nečekaném pádu předmětů, zamezilo poranění nohou.

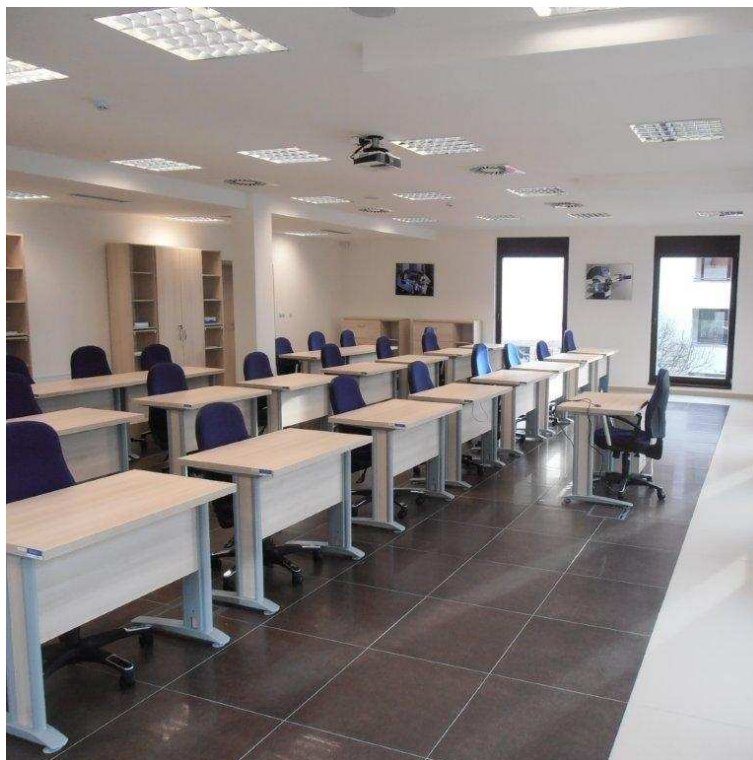
Mezi potřebné pomůcky pro obsluhu ramene FARO patří především notebook vybavený programem kompatibilním s přístrojem, propojovací technika mezi ramenem a notebookem (lze využít i bezdrátového propojení) a kompletní kufřík FARO přístroje, kde nalezneme vše potřebné pro správný chod ramene.



Obr. 21 Kufr s kompletním vybavením (1- přenosný kufřík s ramenem, 2- laserové příslušenství k sondě, 3- kufřík s příslušenstvím, 4- sonda, 5- 7-osá rukojeť, 6- montovací stojan pro rameno) [4].

4.3 Školení obsluhy

Další nutností pro dobře fungující proces měření je vyškolená obsluha. Člověk, který není dobře obeznámen s funkcemi ramene, nemůže vést proces i přesto, že je velmi jednoduchý. Zaškolení pracovníka poskytuje v České republice firma PRIMA BILAVČÍK s.r.o. Tato firma se nachází v Uherském Brodě a nabízí veškerá odborná jednodenní i dvoudenní školení v oblasti moderních měřicích přístrojů. Pro tyto účely byla postavena tzv. PRIMA akademie, kde se v předem daných časech konají školení různých druhů [14].



Obr. 22 Školící prostory PRIMA akademie [14].

4.4 Nacenění

Tato kapitola je věnována cenovým informacím, které autor zjistil od dodavatele PRIMA BILAVČÍK s.r.o. Bohužel společnost nesdílí ceny jednotlivých produktů. Lze konstatovat, že přibližné ceny ramen FARO se pohybují od 20 000 do 120 000 euro. Cena závisí především na velikosti měřicího ramene. Určuje ji také druh nahanáčeného softwaru a příslušenství.

4.5 Konkurence

Stejně jako auta dnes nejsou vyráběny pouze jedním výrobcem, tak ani měřicí ramena nepocházejí jen od společnosti FARO. Je tedy třeba představit i konkurenci značky FARO, která není malá a v posledních letech přibývá firem, které se pouštějí do konstrukce podobných ramen.

Jednou z největších konkurenčních firem je firma Hexagon Metrology, která se vyvinula z dřívější menší firem CimCore. Tato společnost byla založena v roce 2000 v USA. Zabývá se výrobou průmyslových měřidel a samozřejmě tedy i výrobou měřicích ramen. [15]



Obr. 23 Logo společnosti CimCore [15].



Obr. 24 Logo společnosti Hexagon Metrology [16].

Mezi další konkurenty patří firma Metronor. Tato společnost má centrálu v norském Oslu a vyniká nejen výrobou měřicí techniky do průmyslu, ale i výrobou vojenské a medicínské techniky [17].



Obr. 25 Logo společnosti Metronor [17].

Všechna ramena od výše představených výrobců pracují na podobném principu. Ramena společnosti FARO Technologies Inc. vynikají uživatelskou příjemností a opravdu vysokou rychlostí měření. Naopak ramena od společnosti Hexagon Metrology, která nesou označení ROMER mají tu vlastnost, že je není třeba kalibrovat před měřením, díky absolutním čítačům polohy [3], [15], [16], [17].

4.6 Dodatečné informace

Ať už je měřicí technologie FARO využívána pro zlepšení kvality metrologie, urychlení pracovních procesů nebo k reverznímu inženýrství, budou zákazníci zajímat přesnější hodnoty této problematiky. Je třeba konstatovat, že největší výhodou je právě rychlé měření. Při ověřování geometrických tolerancí autorova dílu trvalo odborné obsluze stanovit přesnosti dvou geometrických tolerancí asi 90 vteřin. Ověření celkových rozměrů (4 měření) zabralo necelých 20 vteřin. Po zprůměrování hodnot vyplývá, že obecně pro určení geometrické tolerance (zahrnuje více Měřicích kroků) stačí 45 vteřin a určení rozměru nezabere ani 5 vteřin. Samozřejmě je brán jen čistý čas měření. Ten je v porovnání s klasickým posuvným měřidlem kratší a být připočtena i doba přípravy. Pod tuto dobu u Měřicích ramen FARO spadá hlavně ukotvení součásti. Je nutné nejprve dobře promyslet, jak bude proces probíhat a podle něj součást uchytit. Pak rameno vynikne svým vysokorychlostním a přesným měřením.

5 DISKUZE

Tato kapitola vyřeší velké množství otázek kolem měřicího procesu, samotného měřidla a věnuje čas předpokladům měření.

5.1. Sériová výroba

První otázkou je, jak obstojí ramena FARO v sériové výrobě. Základní problematika, kterou by měla každá firma přemýšlející o rameni pro sériovou výrobu zvážit je, zda-li je tato technologie nezbytně nutná pro ověření rozměrů prototypů daného produktu.

Typy produktů, pro které není vhodné použití Měřicích ramen:

- příliš malé součástky (šrouby, matice, podložky, ...),
- tvarově jednoduché předměty (víka, tabule, ...),
- součásti nenáročné na přesné rozměry,
- malá různorodost produktů v sériové výrobě.

Při sériové výrobě menších kusů se koupě ramene nevyplatí. Díky kulovému dotyku sondy o průměru 2-3 mm (záleží na typu ramene), může být měření příliš malých součástí nepřesné. Čím větší plocha je měřena, tím menší je odchylka.

Pokud by se jednalo o sériovou výrobu součástí, které by nebyly tvarově složité, pak by se na měření prototypů dalo použít jiné měřidlo. Tímto krokem by bylo ušetřeno mnoho nákladů.

Podobně tomu tak je i při měření součástí, kde není třeba dosahovat přesnějších rozměrů s odchylkou menší než 0,1 mm. V tomto případě je rozumnější zvolit jiná měřidla. Opět dojde k finanční úspoře.

Poslední variantou, kdy není vhodné užití FARO technologie je nevariabilní sériová výroba. Jakmile firma vyrábí jen jeden druh součástí není třeba ověřovat prototypové součásti.

Typy produktů, pro které je vhodné použití Měřicích ramen:

- tvarově složité součásti (automobilový průmysl, letecký průmysl),
- duté součásti,
- rozměrné součásti (lopatky turbín, válcové skruže).

Ramena značky FARO mají široké využití, a to zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Vyrábí se zde totiž velké množství tvarově náročných součástí, kterým předchází mnoho různých prototypů. Ty jsou náročné na přesnější rozměry, a proto tu má FARO velkou výhodou [1], [3].



Obr. 26 Měření sedacího křesla ramenem FARO v automobilovém průmyslu [18].

Na duté součásti technologie FARO vyhovuje. Na začátku práce bylo autorem představeno několik typů ramen, které se daly pomocí příslušenství proměnit v pohodlné skenovací zařízení. Firma rozhoduje, jestli investuje do ramene s přídatným, ale ne tak výkonným skenerem, anebo si pořídí přímo profesionální skener značky FARO, který skenuje povrch součásti daleko rychleji [3], [18].



Obr. 27 Skenování součástí skenovacím ramenem FARO [18].

I na opravdu rozměrné kusy jsou ramena FARO dobře vybavena. Již hodně společností využívá jejich výhod při měření turbínových lopatek, trupu lodí či velkých skruží. V tomto případě je téměř nutností firem vlastnit měřicí ramena, která budou kontrolovat správné rozměry. Jiné měřicí prostředky v těchto ohledech selhávají buď nedostatečnou přesností nebo tím, že nejsou vůbec schopny velké součásti změřit [3], [18].



Obr. 28 Měření velkorozměrové součásti ramenem FARO [18].

5.2 Výsledky

Samotné ověřování geometrických tolerancí bylo pomocí ramene FARO velmi rychlé a snadné. Alespoň tedy pro vyškoleného měřícího technika. Zkrátit čas tohoto procesu by bylo možné jen větší přípravou. Co se týče kvality měření, je třeba konstatovat, že součást byla vysokou teplotou od svařování deformována, a proto se ve výsledcích objevili velké odchylky. Bohužel se nepodařilo sehnat lepší svařenou součást. Pro názornost, jak celý proces probíhá to bylo dostačující.

Zabránit deformaci při svařování se dalo tuhým upnutím přípravku. Nedošlo by tak k prohnutí základní desky a eliminuje se tak pokrivení při svařecím procesu.

ZÁVĚR

Na výkrese byly předepsány geometrické tolerance a pomocí technologie FARO se ověřilo, jestli měřená součást odpovídala předepsaným hodnotám.

Konkrétně šlo o tolerance kolmosti podstavy s osou válce a souososti otvoru v podstavě s válcem. Hodnota maximální přípustné odchylky kolmosti byla předepsána na 0,08 mm a hodnota maximální přípustné odchylky u souososti na 0,2 mm. Ramenem byla naměřena hodnota odchylky 0,24 mm u tolerance kolmosti a hodnota odchylky u tolerance souososti 1,55 mm. Tyhle výsledky potvrdily, že se jedná o nevhodný kus.

Při ověřování celkových rozměrů byly předepsány odchylky na $\pm 0,1$ mm. Jedná se o rozměr vnějšího průměru válce a průměru otvoru ve spodní podstavě. Rameno se naměřila odchylka 0,04 mm u vnějšího průměru válce a odchylka 0,09 mm u průměru otvoru ve spodní podstavě. Z toho plynou rozměry 60,04 mm pro vnější průměr válce a rozměr 20,09 mm pro průměr otvoru v základně. S těchto hodnot vyplývá, že celkové rozměry odpovídají předepsaným hodnotám.

I přes dostatečně přesné celkové rozměry součásti, musí být součást označená jako nevyhovující kus, kvůli větším než maximálně dovoleným předepsaným odchylkám v geometrických tolerancích.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FARO Technologies Inc. - 3D měřicí přístroje a ramena. FARO - 3D *měřicí přístroje a ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-2/De> CHIFFRE, L., et al. Quantitative characterisation of surface texture. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2000, vol. 49, no. 2, p. 635-652. ISSN 0007-8506
2. FARO Technologies Inc. Měřicí ramena FARO. In: *Měřicí ramena FARO* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/merici-ramena-faro/>
3. FARO Technologies Inc. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/merici-ramena-faro/>
4. FARO Edge and FARO Laser ScanArm Edge Manual [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. ISBN. Dostupné z:
5. FARO Edge. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-arm-edge/>
6. FARO Fusion. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-arm-fusion-0/>
7. FARO Prime. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-arm-prime/>
8. FARO Gage. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-gage/>
9. FARO Laser Line Probe V3. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-laser-line-probe-v3/>
10. FARO Laser Line Probe V4. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/faro-laser-line-probe-v4/>
11. FARO ScanArm HD. *Měřicí ramena* [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/scanarm-hd/>
12. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
13. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s. : il. ISBN 80-7204-283-1.
14. FARO služby. FARO -PRIMA akademie [online]. : 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/prima-akademie-0/>
15. CimCore portable measuring arms. CimCore arms [online]. : 2016 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://go.hexagonmi.com/cimcore>
16. Hexagon metrology. Hexagon manufacturing intelligence [online]. : 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.hexagonmetrology.cz/>
17. Metronor. History of Metronor technology [online]. : 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.metronor.com/industrial/history/>
18. FARO Technologies Inc. FARO Factory Metrology [online]. : 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://factory-metrology.faro.com/en/>

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Měřicí ramena FARO
- Obr. 2 Rameno FARO Edge – pohled zepředu
- Obr. 3 Rameno FARO Edge – pohled zezadu
- Obr. 4 Rameno FARO Edge – základna
- Obr. 5 FARO Edge
- Obr. 6 FARO Fusion
- Obr. 7 FARO Prime
- Obr. 8 FARO Gage
- Obr. 9 FARO Laser Line Probe V3
- Obr. 10 FARO Laser Line Probe V4
- Obr. 11 FARO ScanArm HD
- Obr. 12 Fotografie měřené součásti.
- Obr. 13 Měřená součást – Autodesk Inventor 2017.
- Obr. 14 Hlavní nabídka programu
- Obr. 15 Výběr příkazů při měření součásti
- Obr. 16 Pravidlo pravé ruky
- Obr. 17 Nastavení pro součást rovina-přímka-kruh
- Obr. 18 Umístění souřadného systému po sjednocení modelu se součásti.
- Obr. 19 Geometrické tolerance výkresu
- Obr. 20 Laserové sondy, vyobrazení varování před laserovým paprskem
- Obr. 21 Kufr s kompletním vybavením
- Obr. 22 Školící prostory PRIMA akademie
- Obr. 23 Logo společnosti CimCore
- Obr. 24 Logo společnosti Hexagon Metrology
- Obr. 25 Logo společnosti Metronor
- Obr. 26 Měření sedacího křesla ramenem FARO v automobilovém průmyslu
- Obr. 27 Skenování součástí skenovacím ramenem FARO
- Obr. 28 Měření velkorozměrové součásti ramenem FARO

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

- Tab. 1 Vyhodnocené údaje ke kolmosti.
- Tab. 2 Vyhodnocené údaje k souososti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Popis
CAD	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice
LED	Light Emitting Diode
LCD	Liquid crystal display
3D	Trojrozměrné
HD	High-definition

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Úvodní strana výstupního protokolu.
Příloha 2	Výkres měřené součásti.
Příloha 3	Vyrovnání součásti k počítačovému modelu 1.
Příloha 4	Vyrovnání součásti k počítačovému modelu 2.
Příloha 5	Naměřené hodnoty kolmosti a vnějšího průměru válce.
Příloha 6	Naměřené hodnoty průměru otvoru a sousostí válce s otvorem.
Příloha 7	Porovnání středů válce a otvoru.
Příloha 8	Funkční body naměřené ramenem.